

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНА ПО СПИРАЛЬНОМУ ДИСКУ СУШИЛКИ

Курдюмов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности», заслуженный изобретатель РФ
Исаев Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и физика»

Павлушин Андрей Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Сутягин Сергей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, дом 1; тел.: 89050359200; e-mail: andrejpavlu@yandex.ru.

Ключевые слова: спираль, единичный зерновой слой, нагрев, движение зерна, кольцевой зазор, дифференциальные уравнения движения.

Теоретическое исследование имеет цель установить количественные и качественные связи между параметрами, изменяющимися в процессе тепловой обработки и параметрами разрабатываемой установки, а также обосновать требования к электроконтактной установке. Эксперименты и графики, изложенные в работе по итогам результатов теоретических исследований, позволяют выявить особенности перемещения материальной частицы спиральным диском при различных угловых скоростях вращения спирали ω . Так, например, угловое j и линейное s и перемещения частицы спустя 3 с после начала вращения спирали стабилизируются. Характер изменения угловой скорости частицы w и ее линейной скорости u стабилизируется уже через 1 с после начала работы. Авторами предложена запатентованная конструкция контактной зерносушилки. Технический результат, достигаемый при использовании изобретения, – повышение качества сушки зерна и снижение затрат энергии на сушку. Указанный технический результат достигается тем, что кожух располагают вертикально. Транспортирующий рабочий орган выполняют в виде плоской пружины. Высоту плоской пружины принимают равной максимальному размеру высушиваемого зерна. Загрузочный бункер устанавливают над плоской пружиной у её внешнего края. Ширину выпускного окна загрузочного бункера принимают равной расстоянию между соседними витками плоской пружины. На плоской пружине устанавливают жёстко связанную с ней и снабжённую приводом перфорированную пластину круглой формы, причём радиус пластины не превышает расстояния от центра плоской пружины до выпускного окна загрузочного бункера. Нагревательный элемент располагают под транспортирующим рабочим органом и выполняют в виде плоского кольца, внешний диаметр которого равен внутреннему диаметру кожуха, а внутренний диаметр плоского кольца равен диаметру внутреннего витка плоской пружины. Выгрузное окно выполняют круглой формы и устанавливают соосно кожуху под нагревательным элементом. Диаметр выгрузного окна принимают равным внутреннему диаметру плоского кольца.

Работа выполняется в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – докторов наук МД-1673.2018.8

Введение

Значимость качественного и своевременного снижения влажности свежесобранного зерна до кондиционных значений очень велика. При этом особенно важно обеспечить сохранность семенных свойств зерна [1]. Тепловая обработка в существующих высокопроизводительных зерносушилках конвективного типа зачастую не отвечает требованиям по равномерности воздействия агента сушки на обрабатываемый продукт [2]. Возникающая неравномерность температуры нагрева зерна приводит к его локальному перегреву, что пагубно влияет на качество сушки всей партии зерна семенного назначения.

Научно обосновано, что максимальная температура нагрева семенного зерна при его сушке не должна превышать температуру, при которой происходит нарушение естественной пространственной структуры молекул белка (денатурация) [3]. Процесс денатурации белковых молекул под действием высокой температуры является необратимым, поэтому обеспечение равномерности нагрева семенного зерна – задача первостепенной важности из всех технологических задач, решаемых при реализации процесса контактной сушки.

Контактный способ подвода теплоты при его осуществлении с использованием специализированных рабочих органов, обеспечивающих равномерное тонкослойное движение обраба-

тываемого материала, позволяет достичь высокого качества сушки семенного зерна.

При этом разрабатываемые на основе данного способа энергоподвода зерносушилки обладают рядом преимуществ в сравнении с серийно выпускаемыми зерносушилками, в которых реализуются другие способы удаления влаги из зерна [4].

Многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями установлены оптимальные параметры различных транспортирующих рабочих органов для зерносушилок контактного типа [5, 6, 7]. Однако развитие техники и технологий привело к появлению новых направлений совершенствования используемых для сушки зерна средств механизации [8]. Так, перспективным направлением в обеспечении равномерности сушки семенного зерна является использование транспортирующего рабочего органа, выполненного в виде спирали Архимеда [9].

Объекты и методы исследований

Цель проводимых исследований – теоретическое обоснование параметров движения зерна в разрабатываемом средстве механизации процесса сушки семенного зерна.

Технический результат, достигаемый при использовании предлагаемого средства механизации процесса контактной сушки семенного зерна (рис. 1) – обеспечение сохранности семенных свойств зерна и снижение суммарных затрат энергии на сушку [9].

При этом технические решения, позволяющие достичь указанной цели, раскрываются в следующих положениях (рис. 2).

Повышение качества сушки при использовании предлагаемого средства механизации также обеспечивается и вследствие лёгкой вы-

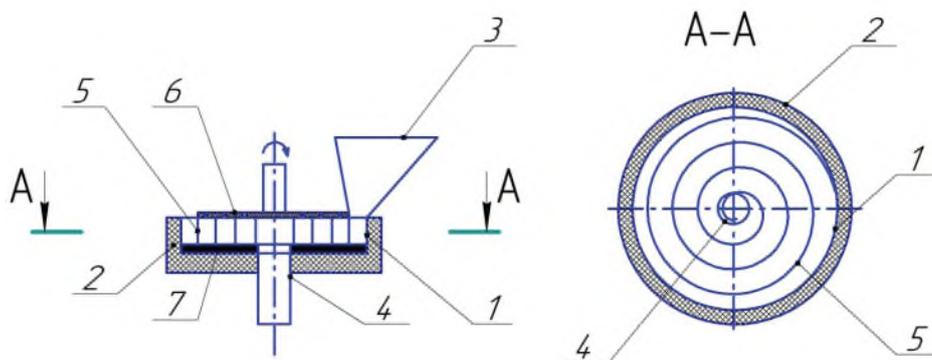


Рис. 1 - Схема зерносушилки контактного типа со спиральным транспортирующим рабочим органом:

1 – цилиндрический кожух; 2 – теплоизолирующий материал; 3 – загрузочный бункер; 4 – выгрузное окно; 5 – транспортирующий рабочий орган; 6 – перфорированная пластина; 7 – нагревательный элемент

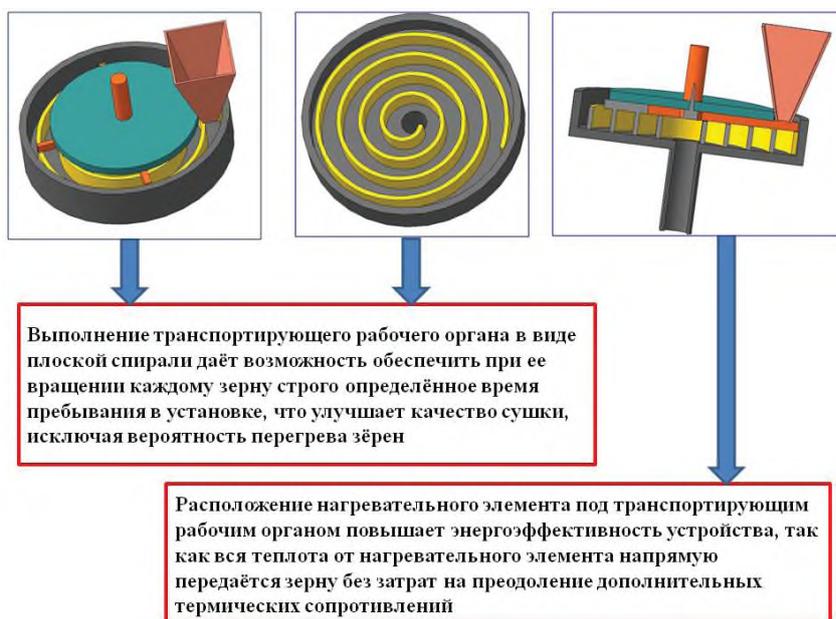


Рис. 2 - Отличительные признаки предлагаемого средства механизации

грузки высушенного зерна за счёт размещения выгрузного окна круглой формы соосно кожуху под нагревательным элементом и выполнения его диаметром, сопоставимым с габаритами внутреннего плоского кольца.

Результаты исследований

Материал, заполняющий пространство между витками спирали, находится в сложных условиях, вследствие чего задача исследования его движения в стесненном пространстве является одной из сложнейших.

Разбивая мысленно поток материала на отдельные элементарные слои, легко заметить, что у зерна, движущегося в промежутке между

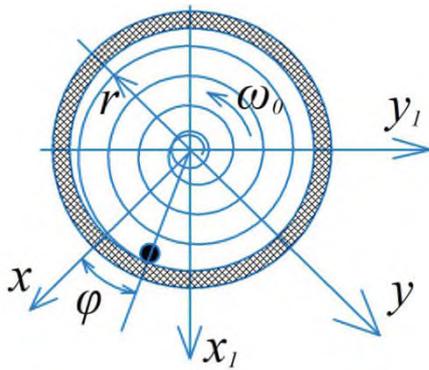


Рис. 3 - Движение частицы между витками спирали

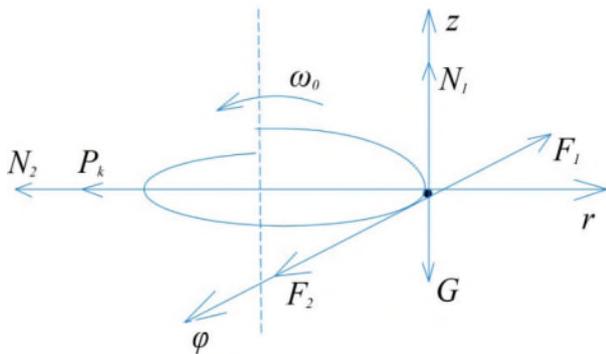


Рис. 4 - Силы, действующие на частицу, движущуюся по диску под действием спирали

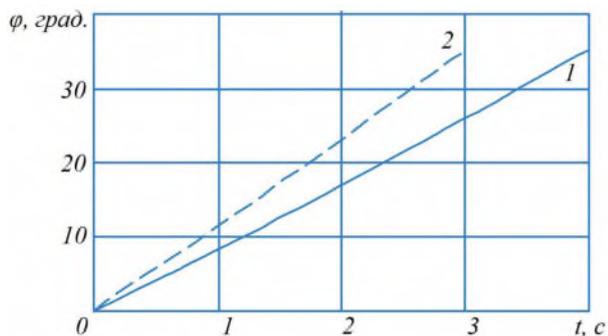


Рис. 5 - Зависимость углового перемещения частицы φ от времени t при различных угловых скоростях вращения спирали ω_0 :
1 - при $\omega_{01} = 10 \text{ c}^{-1}$, 2 - при $\omega_{02} = 13 \text{ c}^{-1}$

соседними витками спирали, имеется множество траекторий. Это связано с тем, что даже при постоянной частоте вращения спирали $n = \text{const}$, вследствие изменения расстояния от зерна до центра диска при r_i при перемещении зерна, линейная скорость его переносного движения $v_n = \omega_0 r_i$, где ω_0 - угловая скорость вращения спирали, c^{-1} , будет изменяться. Кроме того, в общем случае по нормали к виткам спирали

между ними может одновременно располагаться несколько зерен. На направление вектора абсолютной скорости $\bar{V} = \bar{V}_n + \bar{V}_0$, представляющего собой геометрическую сумму векторов переносной и относительной скоростей, оказывают влияние условия взаимодействия частиц рассматриваемого элементарного слоя зерна с соседними частицами в перемещаемом потоке материала.

В связи с этим, целесообразно рассмотреть движение материальной частицы, выделенной на периферии спирального винта и прижатой к его поверхности, а вопрос об определении осевой скорости всего потока транспортируемого зерна решить путем введения в соответствующие уравнения экспериментальных коэффициентов, для получения которых необходимо провести соответствующие опыты.

Пусть ось спирального диска направлена по вертикали. Частица материала при вращении спирали против часовой стрелки увлекается поверхностью спирали и в произвольном промежуточном положении, спустя время t после начала своего движения, смещается относительно центра спирали на угол φ , рад (рис. 3).

Неподвижные оси координат x_1 и y_1 связаны с диском, а подвижные оси x и y - с поверхностью спирали, вращающейся с угловой скоростью ω_0 , c^{-1} . Если угловая скорость относительного движения единичного зерна $\omega = dj/dt$, c^{-1} , то линейная скорость его перемещения $v = r(\omega_0 - \omega)$, м/с .

На рисунке 4 показано направление векторов сил, действующих на частицу, находящуюся на нижнем диске под воздействием спирали на расстоянии r , м , от его центра, в частности: веса частицы: $G = mg$ (где m - масса частицы, кг ; g - ускорение свободного падения, м/с^2); касательной силы инерции; центробежной силы инерции в переносном движении:

$P_n = m v_n^2 / r = m \omega^2 r$; центробежной силы инерции в относительном движении; ; силы Кориолиса: $P_k = m w_k$, где w_k - ускорение Кориолиса, м/с^2 , $w_k = 2\omega_0 v_0$. Но $v_0 = r \cdot d\varphi/dt$, по-

этому $P_k = m \omega_0 r \cdot d\varphi/dt$. Нормальная реакция N_1 , действующая на частицу со стороны нижнего диска, перпендикулярна к его поверхности, а сила трения скольжения направлена в сторону, обратную движению частицы, и располагается на оси φ . Сила трения частицы о диск

$F_1 = f_1 \cdot N_1$, где f_1 – коэффициент трения частицы о диск. Нормальная реакция N_2 , действующая на частицу со стороны внутренней поверхности спирали, направлена радиально внутрь, а сила трения частицы о поверхность спирали $F_2 = f_2 \cdot N_2$ имеет направление, обратное вектору абсолютной скорости, и направлена по оси φ , где f_2 – коэффициент трения частицы о поверхность спирали.

Уравнения движения найдем из условия

$$\sum z = 0 \quad (N_1 - G = 0), \quad \sum \varphi = 0$$

$$(G_1 + F_2 - F_1 - P_t = 0), \quad \sum r = 0$$

$$(P_n + P_0 - N_2 - P_k = 0).$$

Следовательно, движение частицы материала, лежащей на поверхности диска и прижатой к стенке спирали (рисунок 4), можно описать системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} N_1 - mg = 0; \\ f_2 N_2 - f_1 N_1 - mr \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = 0; \\ mr \omega_0^2 + mr \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - N_2 - 2mr \omega_0 \frac{d\varphi}{dt} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Систему уравнений (1) можно решить известными средствами математического анализа и теории дифференциальных уравнений.

Упростим систему уравнений (1) и заменим ее эквивалентным уравнением

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} - f_2 \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + 2f_2 \omega_0 \frac{d\varphi}{dt} + \frac{f_1 g}{r(\varphi)} = f_2 \omega_0^2. \quad (2)$$

Радиус спирали $r(\varphi)$ в зависимости от углового перемещения

$$r(\varphi) = R - \varphi h / (2\pi), \quad (3)$$

где R – внешний радиус спирали, м; h – шаг спирали, м.

С целью получения конкретных данных о характере движения частицы было выполнено численное решение уравнения (3) для спирали, вращающейся с различными угловыми скоростями.

На рисунках 5 - 8 приведены результаты расчетов некоторых характеристик движения материальной частицы по нижнему диску под действием спирали при следующих начальных параметрах: коэффициент трения частицы о диск $f_1 = 0,5$; коэффициент трения частицы о поверхность спирали $f_2 = 0,5$; внешний радиус спирали

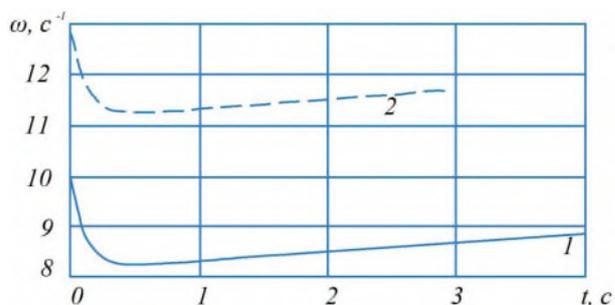


Рис. 6 - Зависимость угловой скорости частицы ω от времени t при различных угловых скоростях вращения спирали ω_0 : 1 - при $\omega_{01} = 10 \text{ c}^{-1}$, 2 - при $\omega_{02} = 13 \text{ c}^{-1}$

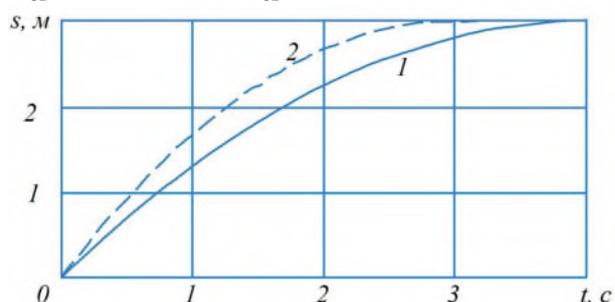


Рис. 7 - Зависимость линейного перемещения частицы s от времени t при различных угловых скоростях вращения спирали ω_0 : 1 - при $\omega_{01} = 10 \text{ c}^{-1}$, 2 - при $\omega_{02} = 13 \text{ c}^{-1}$

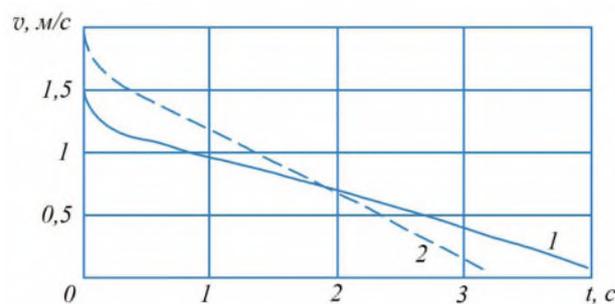


Рис. 8 - Зависимость линейной скорости частицы v от времени t при различных угловых скоростях вращения спирали ω_0 : 1 - при $\omega_{01} = 10 \text{ c}^{-1}$, 2 - при $\omega_{02} = 13 \text{ c}^{-1}$

$R = 0,15 \text{ м}$; угловая скорость вращения спирали $\omega_{01} = 10 \text{ c}^{-1}$ и $\omega_{02} = 13 \text{ c}^{-1}$; шаг спирали $h = 0,025 \text{ м}$.

Анализ рисунков позволил выявить особенности перемещения материальной частицы спиральным диском при различных угловых скоростях вращения спирали ω_0 . Так, например, угловое φ и линейное s и перемещения частицы спустя 3 с после начала вращения спирали стабилизируются. Характер изменения угловой скорости частицы ω и ее линейной скорости v стабилизируется уже через 1 с после начала работы.

Выводы

Указанные выше предпосылки дают возможность обеспечить стабильность протекания технологических процессов в устройствах, где в качестве основного рабочего органа используют вращающуюся на диске спираль. Совокупность предлагаемых теоретических положений и технических решений позволит обеспечить бережную сушку зерна семенного назначения без снижения его качественных показателей.

Библиографический список

1. Трисвятский, Л.А. Технология приема, обработки, хранения зерна и продуктов его переработки / Л.А. Трисвятский, Б.Е. Мельник. - М.: Колос, 1983. - 351 с.
2. Vargas, W.L. Heat conduction in granular materials / W.L. Vargas, J.J. McCarthy // AIChE Journal. - 2001. - № 47. - P. 1052-1059.
3. Баум, А.Е. Сушка зерна / А.Е. Баум, В.А. Резчиков. - М.: Колос, 1983. - 223 с.
4. Yadollahinia, A.R. Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products / A.R. Yadollahinia, M. Omid, S. Rafie // Int. J. Agri. Biol. - 2008. - № 10. - P. 61-65.
5. Курдюмов, В.И. Результаты контактной сушки зерна различных культур при тонкослой-

ном перемещении высушиваемого материала / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, М.А. Карпенко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2013. - № 10 (108). - С.106-110.

6. Курдюмов, В.И. Теоретические аспекты распределения теплоты в установке контактного типа при сушке зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин // Инновации в сельском хозяйстве. - 2015. - № 2 (12). - С.159-161.

7. Wang, L.J. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology / L.J. Wang, D.W. Sun // Trends in Food Science Technology. - 2001. - № 12. - P. 174-184.

8. Пат. 96639 Российская Федерация, МПК F26B 3/00. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.А. Постников; патентообладатель ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА. - № 2010106454/22; заявл. 24.02.10; опубл. 10.08.10, Бюл. № 22. - 1 с.

9. Пат. 167410 Российская Федерация, МПК A23B 9/08. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко; С.А. Сутягин; П.С. Агеев; В.И. Долгов; патентообладатель ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. - № 2016130462; заявл. 25.07. 16; опубл. 10.01.17, Бюл. № 1. - 1 с.

PECULIARITIES OF GRAIN MOVEMENT ON DRYER SPIRAL DISC

*Kurdyumov V.I., Isaev Yu.M., Pavlushin A.A., Sutyagin S.A.
FSBEI HE Ulyanovsk SAU*

432017, Ulyanovsk, Novyi Venets Boulevard, 1; tel: 89050359200; e-mail: andrejpavlu@yandex.ru.

Key words: spiral, single grain layer, heating, grain movement, annular gap, differential equations of motion.

The theoretical study aims at establishing quantitative and qualitative relationships between the parameters that change during the heat treatment process and the parameters of the plant being developed, as well as to justify the requirements for the electrical contact plant. Experiments and graphs outlined in the work based on the results of theoretical studies allow us to identify features of movement of a material particle by a spiral disk at different angular velocities of the spiral ω_0 . For example, the angular ω and linear s and particle movement $3s$ after the start of rotation of the spiral stabilize. The nature of the change in the angular velocity of the particle ω and its linear velocity v stabilizes within 1 second after the start of work. The authors have proposed a patented design of a contact grain dryer. The technical result achieved when using the invention is to improve the quality of grain drying and reduce energy costs for drying. This technical result is achieved by the fact that the casing is placed vertically. The transporting working body is made in the form of a flat spring. The height of the flat spring is equal to the maximum size of the dried grain. The hopper is installed above the flat spring at its outer edge. The width of the outlet box of the loading hopper is equal to the distance between adjacent turns of the flat spring. A round-shaped plate rigidly connected with the flat spring and fitted with a drive is installed on a flat spring; the plate's radius does not exceed the distance from the center of the flat spring to the outlet window of the loading hopper. The heating element is placed under the transporting working body and is made in the form of a flat ring, the outer diameter of which is equal to the inner diameter of the casing, and the inner diameter of the flat ring is equal to the diameter of the inner turn of the flat spring. The outlet window is made round and it is installed coaxially the casing under the heating element. The diameter of the outlet window is equal to the inner diameter of the flat ring.

Bibliography

1. Trisvyatsky, L.A. Technology of receiving, processing, storage of grain and its products / L.A. Trisvyatsky, B.E. Melnik. - M.: Kolos, 1983. - 351 p.
2. Vargas, W.L. Heat conduction in granular materials / W.L. Vargas, J.J. McCarthy // AIChE Journal. - 2001. - № 47. - P. 1052-1059.
3. Baum, A.E. Drying of grain / A.E. Baum, V.A. Rezchikov. - M.: Kolos, 1983. - 223 p.
4. Yadollahinia, A.R. Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products / A.R. Yadollahinia, M. Omid, S. Rafie // Int. J. Agri. Biol. - 2008. - № 10. - P. 61-65.
5. Kurdyumov, V.I. The results of contact drying of grain of various crops with thin-layer movement of the dried material / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, G.V. Karpenko, M.A. Karpenko // Vestnik of Altai State Agrarian University. - 2013. - № 10 (108). - P.106-110.
6. Kurdyumov, V.I. Theoretical aspects of the distribution of heat in the installation of the contact type when drying grain / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, S.A. Sutyagin // Innovations in agriculture. - 2015. - № 2 (12). - P.159-161.
7. Wang, L.J. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology / L.J. Wang, D.W. Sun // Trends in Food Science Technology. - 2001. - № 12. - P. 174-184.
8. Pat. 96639 Russian Federation, IPC F26B 3/00. A device for grain drying / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, I.A. Postnikov; patent holder FSEI HE Ulyanovsk State Agricultural Academy. - № 2010106454/22; appl. 24.02.10; publ. 10.08.10, Bul. № 22. - 1 p.
9. Pat. 167410 Russian Federation, IPC A23B 9/08. A device for grain drying / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, G.V. Karpenko; S.A. Sutyagin; P.S. Ageev; V.I. Dolgov; patent holder Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P.A. Stolypin. - № 2016130462; appl. 25.07. 16; publ. 10.01.17, Bul. № 1. - 1 p.

